

Perancangan dan Implementasi Multi-Input Konverter *Buck* Untuk Pengisian Baterai Menggunakan Panel Surya dan Turbin Angin

Zainul Arifin, Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D dan Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: zainul12@mhs.ee.its.ac.id ; dedet@ee.its.ac.id ; suryomgt@ee.its.ac.id

Abstrak— Baterai adalah sebuah peralatan listrik yang berfungsi untuk menyimpan energi pada peralatan elektrik, elektronik, maupun peralatan otomotif. Perkembangan teknologi pembangkitan tenaga listrik dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan saat ini berkembang pesat sehingga diharapkan mampu menjadi sumber listrik alternatif. Untuk membuat sistem yang diharapkan dilakukan dengan cara menggabungkan sumber-sumber energi listrik yang ramah lingkungan dan melimpah seperti sel surya dan turbin angin. Tujuan dari penggunaan teknologi Konverter *multi-input* (MIC) adalah untuk menggabungkan keluaran tegangan panel surya dan turbin angin agar kedua sumber dapat bekerja secara mandiri atau pun bersama-sama. Konverter *multi-input* adalah konverter yang mempunyai *input* lebih dari satu. Pada Tugas Akhir ini daya yang dihasilkan dari MIC akan digunakan untuk pengisian baterai. Pengoperasian MIC dilakukan dengan mengatur *duty cycle* yang berupa modulator PWM yang dipasang pada sakelar masing-masing sumber. Sedangkan tegangan keluaran dari MIC dijaga konstan untuk pengisian baterai dengan mode *constant voltage*. Dalam implementasi dapat dibuktikan bahwa dengan menggunakan dua sumber *input* tegangan dan beban resistor, tegangan keluaran konverter tetap terjaga konstan

Kata Kunci: Panel surya, Baterai, konverter DC-DC, Konverter *multi-input*

I. PENDAHULUAN

Perkembangan pemanfaatan sumber energi terbarukan seperti energi surya dan energi angin menjadi energi listrik saat ini yang telah meningkat secara signifikan. Penggunaan energi terbarukan tersebut juga diiringi oleh pertumbuhan teknologi elektronika daya yang cepat dan semakin canggih, namun ketersediaan energi matahari dan energi angin bergantung pada waktu, cuaca dan musim. Contoh kasus yang pertama adalah saat musim kemarau, energi matahari berlimpah akan tetapi kecepatan angin pelan, yang kedua saat musim penghujan, karena mendung cahaya matahari tertutup awan sedangkan angin tertiup kencang. Karena melihat kenyataan itu dibuatlah teknik *hybrid* dimana tenaga panel surya dan turbin angin dipadukan sehingga lebih handal untuk menyuplai tenaga secara kontinu dari pada bekerja secara terpisah[1]-[2].

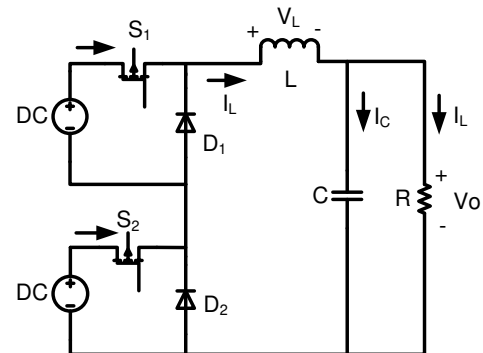
Teknik *hybrid* yang sekarang banyak digunakan adalah menggabungkan beberapa jenis pembangkit listrik yang tidak

dapat diperbaharui maupun yang dapat diperbaharui, Contohnya seperti pembangkit energi angin, surya, dan diesel. Kontribusi dari tugas akhir ini adalah Konverter *multi-input* (MIC) digunakan sebagai solusi alternatif untuk mengkombinasi sumber energi terbarukan yang ada sehingga dapat menyederhanakan dalam mengatur dua sumber yang tersedia, menyederhanakan desain dan mengurangi biaya. Terdapat sebuah kontrol dengan PWM pada setiap sumber agar dapat bekerja bergantian sesuai *Duty cycle* masing-masing [3]. Kedua input dimasukkan kedalam konverter *buck* dimana tegangan keluaran akan lebih kecil dari tegangan input sehingga dapat dikondisikan untuk beban yang mempunyai daya kecil[4].

Dengan mengacu pada rentang tegangan pengisian baterai lead acid, bisa ditentukan nilai tegangan keluaran konverter yang akan dikeluarkan nantinya. Dimana tegangan keluaran konverter harus lebih besar daripada tegangan baterai. Dengan begitu pengisian baterai dapat dilakukan[5]-[6].

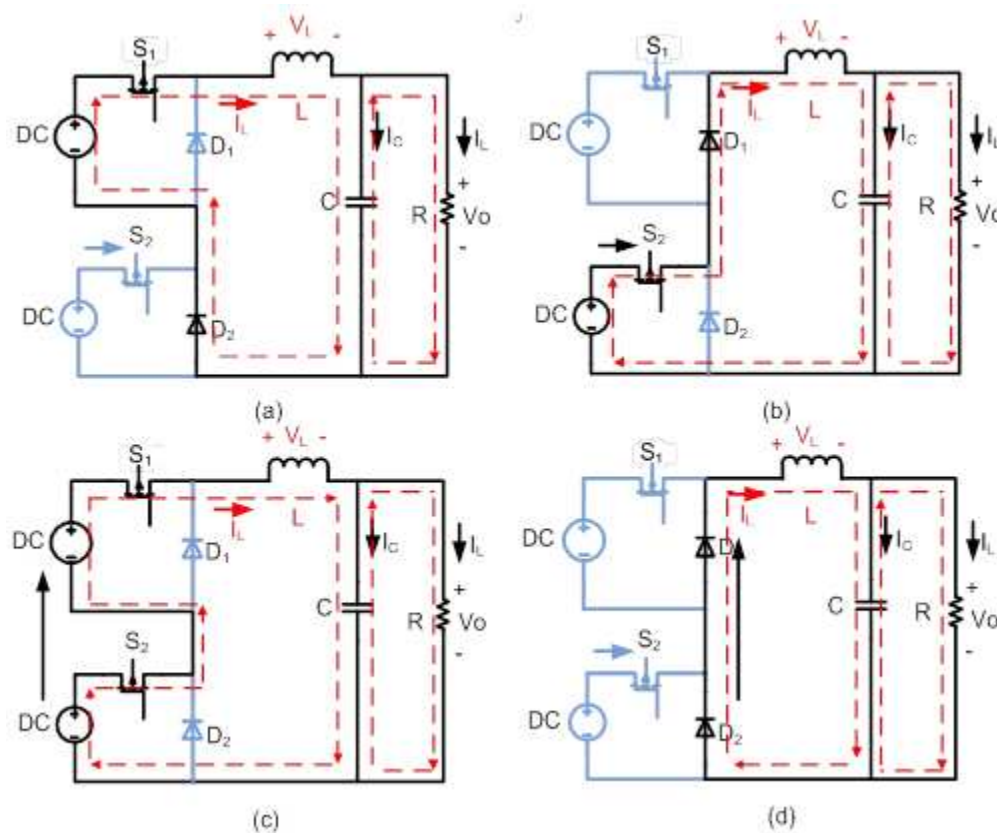
II. URAIAN PENELITIAN

A. Konverter DC-DC *multi-input* konverter *buck*



Gambar 1. Topologi Konverter.

Ketika sakelar pertama S_1 dan sakelar kedua S_2 dimatikan, dioda D_1 dan D_2 akan memberikan jalan *by pass* agar arus induktor mengalir terus menerus. Dengan menerapkan skema Kontrol PWM untuk menyalakan sakelar S_1 dan S_2 , *multi-input* yang direncanakan bisa mengalirkan dua sumber tegangan secara sendiri-sendiri maupun gabungan.

Gambar 2. Operasi konverter *buck multi-input* (a) mode 1 (b) mode 2, (c) mode 3, (d) mode 4

B. Mode Operasi Konverter

Konverter DC-DC *multi-input buck converter* memiliki empat mode operasi dalam satu periode penyakelaran. Dalam melakukan analisis terhadap mode operasi konverter, diasumsikan bahwa semua komponen dianggap dan konverter beroperasi secara *continuous-continuous conduction mode* (CCM) atau arus induktor i_L selalu kontinu [3].

1. Mode 1

Pada saat (S_1 : ON / S_2 : OFF) sakelar satu (S_1) diaktifkan dan sakelar dua (S_2) dimatikan. S_1 konduksi, Dioda D_1 bekerja *reverse bias* dan dianggap sebagai rangkaian terbuka, dan disisi lain V_2 mati sehingga dioda D_2 akan menyediakan jalur by pass untuk induktor sesuai ditunjukkan pada Gambar 2 (a). Dalam mode ini V_1 akan menyuplai komponen penyimpanan daya induktor L dan kapasitor (C) serta beban (R).

2. Mode 2

Pada saat (S_1 : OFF / S_2 : ON) sakelar satu (S_1) dimatikan dan sakelar dua (S_2) diaktifkan. S_2 konduksi, Dioda D_2 bekerja *reverse bias* dan dianggap sebagai rangkaian terbuka, dan disisi lain V_1 mati sehingga dioda D_1 akan menyediakan jalur by pass untuk induktor sesuai ditunjukkan pada Gambar 2 (b). Dalam mode ini V_2 akan menyuplai komponen penyimpanan daya induktor L dan kapasitor (C) serta beban (R).

3. Mode 3

Pada saat (S_1 : ON / S_2 : ON) sakelar satu (S_1) dan sakelar dua (S_2) diaktifkan. Sakelar S_1 dan S_2 konduksi, Dioda D_1 dan dioda D_2 bekerja *reverse bias* dan dianggap sebagai rangkaian terbuka, dan disisi lain V_1 dan V_2 tersusun seri

sesuai ditunjukkan pada Gambar 2 (c), pada mode ini V_1 dan V_2 yang tersusun seri menyuplai komponen penyimpanan daya induktor L dan kapasitor (C) serta beban (R).

4. Mode 4

Pada saat (S_1 : OFF / S_2 : OFF) sakelar satu (S_1) dan sakelar dua (S_2) dimatikan. Sakelar S_1 dan S_2 isolasi, Dioda D_1 dan dioda D_2 bekerja forward bias dan dianggap sebagai rangkaian terbuka. Disisi lain V_1 dan V_2 mati sehingga dioda D_1 dan dioda D_2 akan menyediakan jalur by pass untuk induktor sesuai ditunjukkan pada Gambar 2(d). Dalam mode ini V_1 dan V_2 tidak menyuplai ke beban namun ada arus sisa dari induktor menyuplai kapasitor (C) dan beban (R).

C. Analisis Persamaan konverter *multi-input*

Untuk menentukan besar nilai komponen yang digunakan pada konverter *multi-input buck converter* seperti *duty cycle 1* D_1 , *duty cycle 2* D_2 , kapasitor C , induktor L , *ripple* arus (ΔI_L) maupun *ripple* tegangan keluaran (ΔV_o) keempat mode sebelumnya akan digunakan. Adapun mode 1 dapat diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

$$V_L = V_1 - V_o \quad (2.2)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = V_1 - V_o \quad (2.3)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_1 - V_o}{L} (DT) \quad (2.4)$$

Selanjutnya pada mode 2 yang ditunjukkan pada Gambar 2 (b) didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$V_L = V_2 - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.5)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = V_2 - V_o \quad (2.6)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_2 - V_o}{L} (DT) \quad (2.7)$$

Selanjutnya pada mode 3 yang ditunjukkan pada Gambar 2 (c) didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$V_L = V_1 + V_2 - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.8)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = V_1 + V_2 - V_o \quad (2.9)$$

$$di_L = \frac{V_1 + V_2 - V_o}{L} DT \quad (2.10)$$

$$(\Delta i_L)_{tertutup} = \frac{V_1 + V_2 - V_o}{L} DT \quad (2.11)$$

Dari persamaan 2.11 bisa diketahui nilai dari ripple arus induktor (Δi_L). Selanjutnya pada mode 4 yang ditunjukkan pada Gambar 2 (d) didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$V_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.12)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad (2.13)$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{-V_o}{L} \quad (2.14)$$

$$(\Delta i_L)_{terbuka} = \frac{-V_o}{L} (1-D)T \quad (2.15)$$

Dengan mengaplikasikan prinsip *induktor volt-second balance* dan mengkombinasikan persamaan (2.8), (2.5) dan (2.12) dihasilkan persamaan:

$$\begin{aligned} \int_0^T (V_1 + V_2 - V_o) dt + \int_0^{D_1 T} (V_2 - V_o) dt \\ + \int_0^{D_2 T} (-V_o) dt = 0 \end{aligned} \quad (2.16)$$

Dari persamaan 2.16 diatas diperoleh persamaan dasar untuk konverter *buck multi-input* seperti persamaan:

$$V_o = V_1 D_1 + V_2 D_2 \quad (2.17)$$

Induktor diasumsikan mempunyai induktansi besar sehingga *ripple* arus diabaikan. Ketika S_1 dan S_2 aktif arus yang dihasilkan V_1 dan V_2 (I_1 dan I_2) sama dengan arus yang mengalir di induktor (I_L) sehingga arus rata-rata yang dapat dimasukan dapat ditulis dalam persamaan :

$$I_{S1} = d_1 I_1 = d_1 I_o \quad (2.18)$$

$$I_{S2} = d_2 I_2 = d_2 I_o \quad (2.19)$$

III. DESAIN, SIMULASI DAN IMPLEMENTASI

A. Desain

Desain konverter dilakukan untuk menentukan parameter rangkaian dengan memperhitungkan peralatan yang terdapat di laboratorium dan komponen yang tersedia di pasaran, sehingga mempermudah proses implementasi *prototype* konverter. Tabel 1 di bawah ini menunjukkan parameter awal yang digunakan sebagai acuan dalam proses desain konverter.

Tabel 1.
Spesifikasi Awal Desain Konverter

Parameter	Nilai
Daya Output P_o	30 Watt
Tegangan Output V_o	13.8 Volt
Tegangan Input 1 V_1	17 Volt
Tegangan Input 2 V_2	24 Volt
Switching Frequency (f)	40 kHz
Ripple $V_o(\Delta V_o)$	1 %
Ripple $I_L(\Delta I_L)$	30 %

Tegangan *output multi-input buck converter* harus dijaga konstan sebesar 13.8 Volt dengan bekerja-samanya dua *duty cycle*. Konverter *multi-input* ini bekerja pada tegangan *input* $V_1 = 17$ Volt dan $V_2 = 24$ Volt. Diasumsikan *duty cycle* $D_1 = 50\%$ Dari persamaan 2.17 dapat diperoleh persamaan *duty cycle* sebagai berikut:

$$D_2 = \frac{V_o - V_1 D_1}{V_2} \quad (3.1)$$

$$D_2 = \frac{13.8 - (17 * 0.5)}{24} = 0.22 \quad (3.2)$$

Dari persamaan 2.11 ,jika tegangan *input* 1 V_1 ditambahkan dengan tegangan *input* 2 V_2 sama dengan V sumber V_s , $V_1 + V_2 = V_s$ diperoleh persamaan dan perhitungan sebagai berikut :

$$L = \frac{V_o (1 - \max(D_1, D_2))}{0.3 \left(\frac{P_o}{V_{in}} \right) \cdot f} \quad (3.3)$$

$$L = \frac{13.8 (1 - \max(0.5, 0.22))}{0.3 \left(\frac{30}{17+24} \right) \cdot 40000^2} = 785.8 \mu H$$

Dalam implementasinya nilai induktor dibuat lebih besar dari perhitungan dan dibuat induktor dengan nilai sebesar $800 \mu H$

Dari persamaan muatan yang tersimpan pada tegangan *output*. Adapun persamaan untuk memperoleh nilai kapasitor adalah sebagai berikut :

$$Q = CV_o \quad (3.4)$$

$$\Delta Q = C \Delta V_o \quad (3.5)$$

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} \quad (3.6)$$

Jika perubahan pengisian pada ΔQ adalah segitiga diatas sumbu X maka dihasilkan persamaan :

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left(\frac{T}{2} \right) \left(\frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T \Delta i_L}{8} \quad (3.7)$$

$$\Delta V_o = \frac{T \Delta i_L}{8C} \quad (3.8)$$

$$\Delta V_o = \frac{TV_o}{8CL} (1-D)T = \frac{V_o(1-D)}{8LCf^2} \quad (3.9)$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (3.10)$$

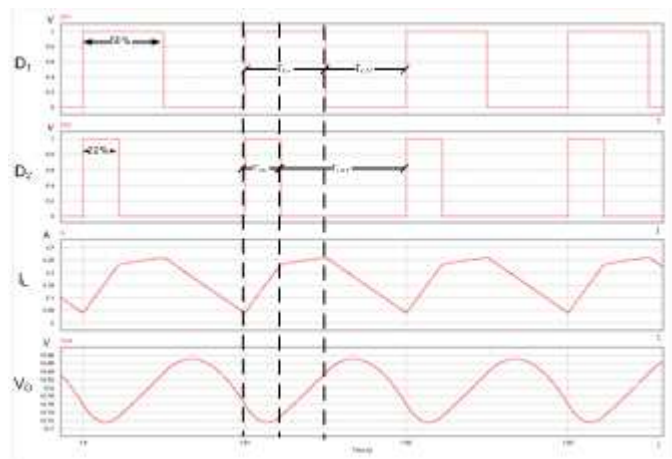
$$C = \frac{1 - \max(D_1, D_2)}{8L \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right) \cdot f^2} \quad (3.11)$$

$$C = \frac{1 - 0.5}{8 \cdot 0.785 \cdot 10^{-3} \cdot 0.01 \cdot 40000^2} = 4.97 \mu F$$

Dalam implementasinya nilai kapasitor disesuaikan dengan kapasitor yang tersedia di pasaran, maka dua kapasitor $10 \mu F$ disusun seri sehingga menghasilkan nilai $5 \mu F$.

B. Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan *software* dengan nilai dari parameter-parameter yang telah dihitung. Untuk nilai induktansi bocor L_{KP} dimasukkan sebesar $5 \mu H$ yang diperoleh dari pengukuran induktor-kopel hasil implementasi menggunakan LCR meter. Simulasi dilakukan dalam kondisi tunak dengan $V_1 = 17$ Volt, $V_2 = 24$ Volt, $D_1 = 0,6$ dan secara perhitungan diperoleh nilai $D_2 = 0.22$.



Gambar 3. Gelombang Arus Induktor dan Tegangan Kapasitor.

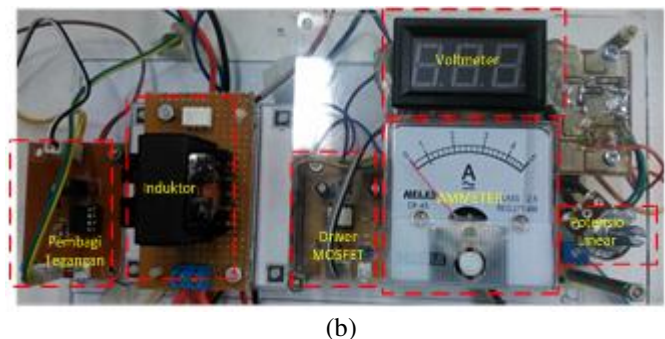
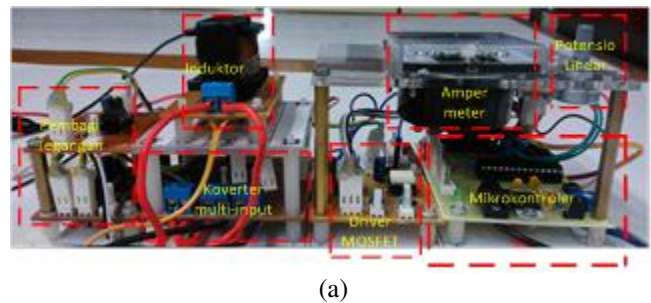
C. Implementasi

Implementasi dilakukan untuk mengetahui kinerja konverter berdasarkan desain dan simulasi yang telah dilakukan. Tabel 2 menunjukkan spesifikasi komponen yang digunakan. Nilai ini diperoleh dari hasil perhitungan dan disesuaikan dengan komponen yang tersedia di pasaran.

Tabel 2.
Spesifikasi Komponen Rangkaian Konverter

Komponen	Nilai
Induktor L_I	800 μH
Kapasitor C	5uF/100 V
Dioda	MUR1560
MOSFET	IRF540

Sesuai dengan komponen pada Tabel 2, Gambar 4 di dibawah menunjukkan hasil implementasi dari konverter DC-DC rasio tinggi dengan induktor-kopel dan dioda-kapasitor.



Gambar 4. Hasil Implementasi Alat (a) Tampak samping (b) Tampak atas

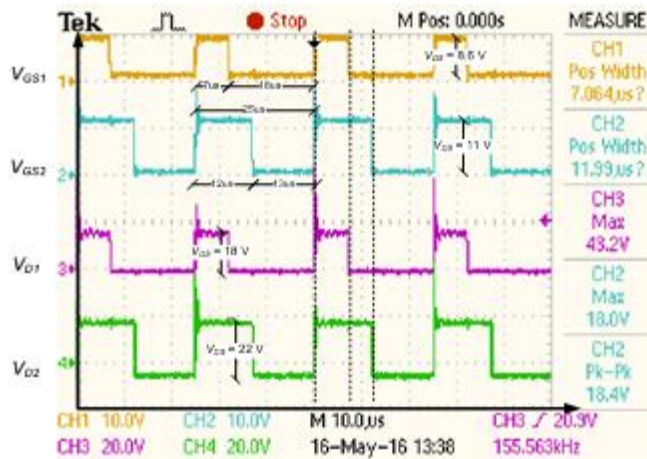
IV. PENGUJIAN

A. Pengujian Gelombang Pensakelaran

Pengujian sinyal PWM dan pensakelaran dilakukan untuk mengetahui apakah bentuk gelombang *output* PWM dan proses pensakelaran pada dioda dan MOSFET sudah bekerja sebagaimana mestinya. Pengujian dilakukan dengan menggunakan osiloskop dengan memberikan tegangan *input* pertama $V_1 = 15$ V, tegangan *input* kedua $V_2 = 20$ V, *duty cycle* pertama $D_1 = 0.28\%$ dan *duty cycle* kedua $D_2 = 0.48\%$ sebagaimana yang tertera pada Tabel 1. frekuensi switching yang digunakan adalah 40 kHz, sehingga besar periode gelombang PWM dan pensakelaran konverter adalah 25 μs .

B. Pengujian Arus induktor terhadap duty cycle

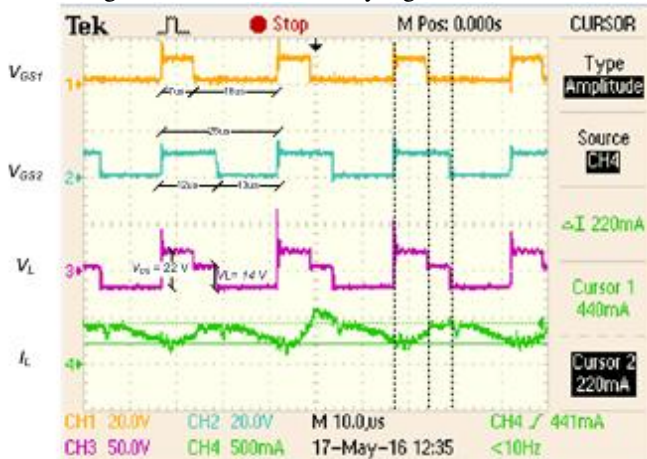
Dari Gambar 4.2 dapat diketahui bahwa dioda D1 dan D2 sudah bekerja sebagaimana mestinya yaitu sesuai dengan mode operasi konverter dan hasil simulasi. Saat tegangan MOSFET G-S 1 atau V_{GS1} dalam kondisi high ($V_{GS1} = 8.6$ V) maka kondisi dioda D1 *reverse bias*. Begitu juga saat tegangan MOSFET G-S 2 (V_{GS2}) atau V_{GS1} dalam kondisi high ($V_{GS1} = 11$ V) maka kondisi dioda D2 juga *reverse bias*. Saat tegangan MOSFET G-S 1 (V_{GS1}) dalam kondisi low ($V_{GS1} = 0$ V) proses sebaliknya terjadi. Begitu pula pada V_{GS2} dan D2.



Gambar 5. Bentuk Gelombang Penyakelaran pada Dioda dan MOSFET

C. Pengujian Arus Induktor dan Tegangan Kapasitor

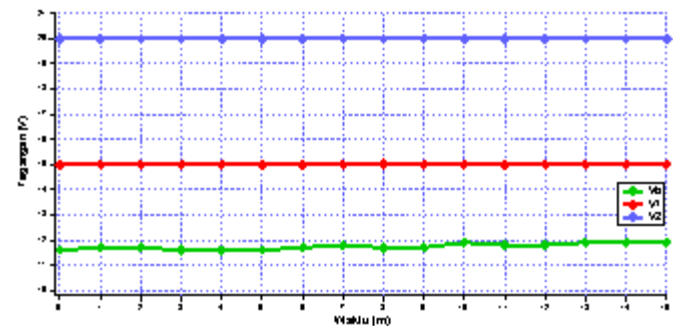
Bentuk gelombang hasil pengujian arus induktor (I_L) saat konverter diberi tegangan input $V_1 = 15$ V ; $V_2 = 20$ V dan *duty cycle* 1 =28% ; *duty cycle* 2 =48% dapat dilihat pada Gambar 6. Dari Gambar tersebut dapat dianalisis bahwa saat VGS konduksi, tegangan Induktor V_L bernilai positif. Induktor mengalami charging energi sehingga arus induktor I_L mengalami peningkatan. Sedangkan saat VGS pada kondisi low tegangan induktor V_L bernilai negatif. Induktor mengalami discharging energi sehingga arus induktor I_L mengalami penurunan. Selain itu nilai arus induktor selalu positif (lebih dari 0). Hal ini membuktikan bahwa konverter beroperasi secara C-CCM (Continuous - Continuous Conduction Mode) sesuai dengan desain dan simulasi yang telah dibahas di bab 3.



Gambar 6. Bentuk Gelombang tegangan induktor (V_L) dan arus induktor (I_L) terhadap MOSFET

D. Pengujian Rasio Konversi

Pengujian rasio konversi dilakukan dengan menggunakan tegangan input $V_1 = 15$ V, $V_2 = 20$ V dan *duty cycle* dinaikkan secara bertahap, *output* terjaga konstan. Gambar 7 di bawah ini menunjukkan grafik hasil pengujian rasio konversi konverter.

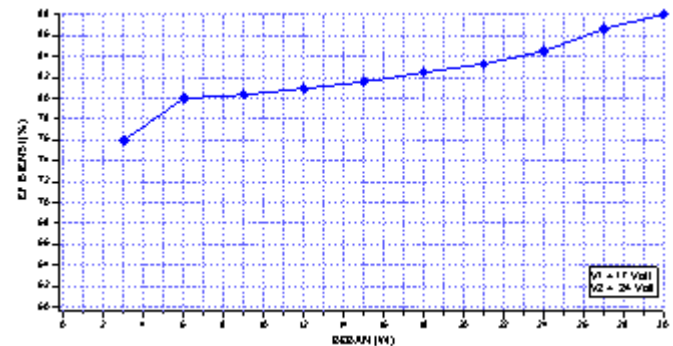


Gambar 7. Pada saat D1 diatur 10-85% dan D2 mengikuti persamaan 3.2 tegangan output dijaga konstan.

Dari grafik diatas, dapat dilihat ketika konverter bekerja pada semua perubahan *duty cycle*, *output* tetap terjaga konstan.

E. Pengujian Efisiensi

Pengujian efisiensi dilakukan pada tegangan input $V_1 = 17$ Volt dan $V_2 = 24$ Volt dengan tegangan *output* dijaga konstan sebesar ± 13.8 Volt. Grafik di bawah menunjukkan hasil pengujian efisiensi konverter.

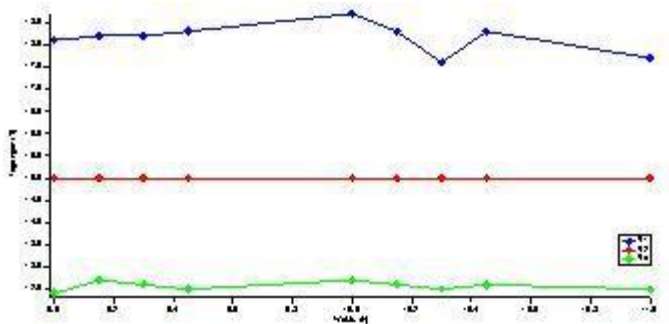


Gambar 8. Grafik Efisiensi Konverter

Dari Gambar 8 dapat diketahui bahwa efisiensi tertinggi konverter adalah saat beban maksimal. Selain itu semakin tinggi tegangan input, semakin tinggi pula efisiensi konverter.

F. Pengujian Menggunakan Modul Fotovoltaik

Pengujian menggunakan modul fotovoltaik dilakukan untuk mengetahui bahwa tegangan *output* konverter dapat dijaga konstan pada tingkat iradiasi yang berbeda. Gambar 9 di bawah menunjukkan hasil pengujian yang dilakukan pada pukul 09.00 hingga 11.00. Pengujian tidak dilanjutkan dikarenakan pada jam 11.00 hujan.



Gambar 9. Grafik Pengujian Menggunakan Modul PV

Dari Gambar 9 dapat diketahui bahwa tegangan *output* konverter dapat dijaga konstan pada tegangan ± 13.8 Volt dengan mengubah *duty cycle* konverter meski tegangan *input* konverter berubah-ubah akibat perubahan intensitas cahaya matahari yang diserap sel surya.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis data hasil simulasi dan pengujian implementasi konverter *buck multi-input* dengan sumber fotovoltaik dan turbin angin, dapat disimpulkan beberapa hal seperti berikut :

1. Konverter *buck multi-input* yang dipakai adalah 1 (satu) konverter *buck* yang mempunyai 2 (dua) *input* yang berkolaborasi menjaga tegangan *output* tetap konstan.
2. Pengujian efisiensi konverter dilakukan dengan beban 10 - 100% dari daya 30 W dan mengalami kenaikan efisiensi saat 20 - 100 %.
3. *Duty cycle* pertama dan kedua berkolaborasi untuk menjaga *output* tetap konstan sesuai nilai (besar) tegangan *input*.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Nugroho. Aditya. 2012. "Konverter multi-*input* Untuk Sistem Pembangkit *Hybrid* Panel surya Dan Turbin Angin". Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- [2]. Y.-M. Chen., S.-C Hung., C.-S.Cheng., and Y.-C.Liu., 2005. "*Multi-input Inverter for Grid-Connected Hybrid PV/Wind Power Sistem*" IEEE Transaction ON 0-7803-8975
- [3]. Lalit Kumar, Shailendra Jain., 2013. "*A multiple source DC/DC converter topology*" Electrical Power and Energi Systems 51 (2013) 278–291
- [4]. Miguel Rodríguez., Pablo Fernandez-Miaja., Alberto Rodríguez., February 2010. "*A Multiple-Input Digitally Controlled Konverter Buck For Envelope Tracking Applications In Radio frequency Power Amplifiers*", IEEE Transaction ON POWER ELECTRONICS, VOL. 25, NO. 2
- [5]. H. Rashid. Muhammad. 2011. "*Power Electronics Handbook 3rd Edition*". Butterworth-Heinemann. Florida : University of West Florida
- [6]. Hart. Daniel W. 2010. "*Power Electronics*". Valparaiso. Indiana : Valparaiso University